# 共享卡车配送服务的演化载体选择

Rakpong Kaewpuang[1], Suttinee Sawadsitang[2*]、Dusit Niyato[1], 和
Han Yu[11]南洋理工大学计算机科学与工程学院[2]清迈大学艺术、媒体与技术学院

arXiv:2301.03635v1 [cs.GT] 6 Jan 2023

摘要——在物流市场中有多家承运商时，客户可以选择最合适的承运商来配送其产品和包裹。本文提出一种利用随机演化博弈分析使用零担运输（LTL）配送服务的客户决策行为的新方法。我们提出相互关联的优化模型和博弈模型，分别用于分析零担承运商的车辆路径优化和客户的承运商选择。随机演化博弈模型纳入了客户决策中由非理性导致的小幅扰动。通过马尔可夫链模型刻画随机演化博弈的解，即随机稳定状态。数值结果展示了承运商和客户的参数对稳定状态的影响。

索引词——演化博弈、演化均衡、整数规划、车辆路径规划问题。

## I. 引言

产品和包裹配送管理是物流业中一个经典而重要的问题。尤其是随着网上购物的日益普及，包裹配送需求呈指数级增长。再加上物流企业之间为吸引客户而展开的激烈竞争，经典的车辆路径问题（VRP）随之产生了各种具有挑战性的问题。具体而言，在考虑物流资源/车辆管理时，不能仅关注寻找最优车辆路径（例如最小化行驶成本），还必须考虑竞争与合作。博弈论成为分析各种物流场景的合适数学工具，在这些场景中，每家物流公司都可以根据其他公司的策略调整自身策略，以获得最佳收益，例如以效用或利润定义的收益。博弈论在物流中的一些应用包括：[1] [2]。在物流业中，多家承运商拥有用于包裹配送的车辆/卡车。客户可以自由选择承运商，以满足自身的需求和要求。虽然决定使用哪家承运商的主要因素是价格或服务费，但近年来，配送服务的绩效和可靠性越来越受到关注。例如，如果包裹配送具有时效性，客户不一定总会选择价格最低的承运商。因此，客户可以根据自身偏好理性地选择承运商，而这种偏好可定义为效用。上述场景通常被称为承运商选择问题。再次，博弈论似乎是分析并求解该问题的一种有前景的方法。然而，由于客户数量庞大，只适用于少数参与者的标准非合作博弈可能并不适用，因此我们必须借助其他博弈模型来解决客户的承运商选择问题。

本文聚焦于零担运输（LTL）环境下的承运商选择问题，其中配送的是少量货物，或不需要占用整辆车辆全部空间的货物 [3]。客户，即参与者，可以根据其他客户的决策进行自适应选择零担承运商[1] ，以获得最高收益。收益取决于配送绩效，即延误，而延误又与配送路线相关。鉴于这一事实，我们引入随机演化博弈来分析承运商选择问题。之所以采用演化博弈，是因为已有研究表明，该方法能够较为简便地应用于参与者数量众多的情形。

此外，参与者非理性决策所导致的小幅扰动也可以在模型中得到体现。该博弈模型能够展示选择某一承运商的客户数量对配送绩效（即平均延误）的影响。此外，物理参数，即承运商位置，对博弈随机稳定状态的影响也得到了呈现。

本文的主要贡献可概括如下：

- 我们提出了相互关联的优化模型和博弈模型，分别用于分析零担承运商的车辆路径优化以及客户的承运商选择。
- 在所提出的模型中，我们构建并求解整数规划（IP）模型，以获得承运商的最低总出行成本。我们采用随机演化博弈模型，求得客户的配送延误和服务费均达到最低的稳定状态。
- 我们通过真实轨迹数据评估模型性能，并将所提出模型的解与基准模型进行比较，展示了所提出模型的优越性。

## II. 相关工作

优化从配送中心或仓库向客户配送包裹以及反向配送的绩效，例如

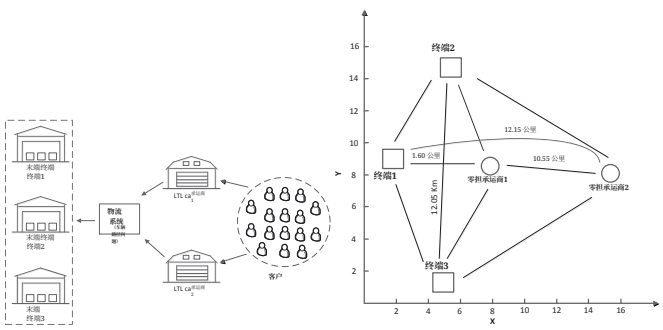
*通信作者（电子邮箱：suttinee.s@cmu.ac.th）。

[1]在本文其余部分中，我们将“零担承运人”和“承运商”交替使用。

降低成本和延误，是一个经典问题，称为自有车队与公共承运人车辆路径问题（VRPPC） [3]。例如， [3] 中的作者提出了一种整车运输和零担运输启发式算法，用于求解 VRPPC。该算法旨在通过选择自有卡车和外包卡车进行配送，最大限度地降低总运输成本。针对这些问题，人们提出了各种启发式算法。然而，承运商的车辆和司机等资源有限。博弈论已被应用于解决物流领域的各种问题。例如， [1], 中的作者介绍了异构环境下的路径博弈，即将司机和车辆视为参与者。参与者选择流量数量，以达到纳什均衡。 [2] 分析了一个类似的流量博弈，其中考虑了司机可获取的 GPS 信息所产生的影响。

然而，客户选择承运商以最小延误地配送其包裹的承运商选择问题此前尚未得到研究。尤其是，当客户能够根据群体中其他客户的决策自适应地调整自身决策时，这一问题更值得关注。演化博弈是分析该问题的有效工具，因此也是本文的主要研究重点。

## III. 系统模型与假设




（a）零担承运商选择。 (b) 参考位置。

图 1：(a) 零担承运人选择；(b) 两家承运商和三个终端的参考位置。

我们考虑客户选择一家零担承运人将包裹配送至终端的场景，如图 1(a) 所示。具体而言，承运商从客户处收取包裹，例如从集货点收取。随后，承运商将包裹装上零担货车，并配送至终端。承运商可以优化包裹配送，这可视为卡车数量固定的车辆路径问题（VRP）。目标是使承运商的配送成本最小化。或者，也可以有多家承运商，客户根据效用（或不效用）选择承运商，该效用取决于服务费和配送延迟。具体来说，客户更倾向于费用和延迟均最小的承运商。

对于承运商选择，我们定义如下集合和符号。令 $\mathcal{T}$ 表示零担承运商配送包裹的终端集合，即 $\mathcal{T} = \{1, 2, 3, \ldots, T\}$，其中 $T$为终端的最大数量。

令 $\mathcal{N}$ 表示零担承运商集合，即 $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, \ldots, N\}$，其中 $N$为零担承运商的最大数量。令 $\mathcal{S}$ 表示客户集合，即 $\mathcal{S} = \{1, 2, 3, \ldots, S\}$，其中 $S$为客户的最大数量。在承运商选择情景中，我们关注的是分析客户如何选择承运商。因此，在以下各节中，我们将介绍面向承运商的车辆路径优化模型，以及面向客户的随机演化博弈模型。给定选择某一承运商的客户数量，车辆路径优化模型用于求得该承运商的最优路线及相应的配送延迟。给定配送延迟，则应用随机演化博弈模型来确定客户选择任一承运商的决策。

## IV. 车辆路径优化

我们提出了针对某一零担承运商的车辆路径优化整数规划模型。该承运商的车辆集合记为 $\mathcal{V}$，车辆需要访问的终端集合记为 $\mathcal{L}$。整数规划模型见式 (1)–(13)。式 (1) 中的目标函数是使承运商的总行驶成本最小化。

$$\min_{x_v, y_{i,j,v}, z_{i,v}} \sum_{v \in \mathcal{V}} x_v C_v^{\text{inc}} \tag{1}$$
$$+ \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{L}, i \neq j} y_{i,j,v} C_{i,j,v}^{\text{tvc}} + \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{i \in \mathcal{U}} z_{i,v} C^{\text{mcn}},$$

subject to

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} y_{i,j,v} = z_{i,v}, \forall i \in \mathcal{U}, \forall v \in \mathcal{V}, \tag{2}$$
$$\sum_{j \in \mathcal{L}} y_{j,i,v} = z_{i,v}, \forall i \in \mathcal{U}, \forall v \in \mathcal{V}, \tag{3}$$
$$\sum_{k \in \mathcal{V}} z_{0,v} \leq |\mathcal{V}|, \tag{4}$$
$$\sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{i \in \mathcal{L}, i \neq j} y_{i,j,v} = 1, \forall j \in \mathcal{U}, \tag{5}$$
$$\sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{L}, j \neq i} y_{i,j,v} = 1, \forall i \in \mathcal{U}, \tag{6}$$
$$D_i^{\text{dem}} \leq q_i \leq C_v^{\text{cap}}, \forall i \in \mathcal{U}, \forall v \in \mathcal{V}, \tag{7}$$
$$q_i \leq C_v^{\text{cap}} + y_{0,i,v}(D_i^{\text{dem}} - C_v^{\text{cap}}), \forall v \in \mathcal{V}, \forall i \in \mathcal{U}, \tag{8}$$
$$q_j \geq q_i + D_j^{\text{dem}} - C_v^{\text{cap}} + (y_{i,j,v} C_v^{\text{cap}}) \tag{9}$$
$$+ y_{j,i,v}(C_v^{\text{cap}} - D_j^{\text{dem}} - D_i^{\text{dem}}), \forall v \in \mathcal{V}, \forall i, j \in \mathcal{U}, i \neq j,$$
$$x_v = z_{0,v}, \forall v \in \mathcal{V}, \tag{10}$$
$$q_i \geq 0, \forall i \in \mathcal{U}, \tag{11}$$
$$z_{i,v} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{U}, \forall v \in \mathcal{V}, \tag{12}$$
$$x_v, y_{i,j,v} \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathcal{V}, \forall i, j \in \mathcal{L}, i \neq j. \tag{13}$$

式（1）中的目标函数由三项组成。第一项 $\sum_{v \in \mathcal{V}} x_v C_v^{\text{inc}}$ 是总初始成本。$C_v^{\text{inc}}$是基于车辆和司机的成本 [10]。 $x_v$ 是二元决策变量，其中 $x_v = 1$ 表示承运商的车辆 $v \in \mathcal{V}$ 用于配送包裹， $x_v = 0$ 则表示不用于配送。第二项

term $\sum_{v\in\mathcal{V}}\sum_{i\in\mathcal{L}}\sum_{j\in\mathcal{L},i\neq j} y_{i,j,v}C^{\mathrm{tvc}}_{i},_{j,v}$ 是总出行成本。$C^{\mathrm{tvc}}_{i},_{j,v}$ 是车辆 $v$ 从终端 $i$ 驶往终端 $j$的行驶成本。该行驶成本根据$C^{\mathrm{tvc}}_{i},_{j,v} = P^{\mathrm{ppm}}D^{\mathrm{dst}}_{i},_{j}$计算，其中 $P$ppm 是每英里价格 [10]，而 $D^{\mathrm{dst}}_{i},_{j}$是从终端 $i$到终端 $j$的距离。$y_{i,j,v}$是二元决策变量，其中 $y_{i,j,v} = 1$ 表示车辆 $v$在终端 $i$之后向终端 $j$ 配送包裹，$y_{i,j,v} = 0$则表示不配送。第三项 $\sum_{v\in\mathcal{V}}\sum_{i\in\mathcal{U}} z_{i,v}C^{\mathrm{mcn}}$ 是总固定成本。 $C^{\mathrm{mcn}}$ 是车辆访问终端时产生的杂项成本，例如包裹处理成本。$z_{i,v}$ 是二元决策变量，其中 $z_{i,v} = 1$ 表示车辆 $v$ 向终端 $i$配送包裹，$z_{i,v} = 0$ 则表示不配送。

约束条件描述如下：(2) 和 (3) 确保车辆 $v$ 仅访问终端 $i$ 一次。对于这些约束，车辆 $v$ 必须将客户所需的所有包裹配送至终端 $i$ [4], [5] 。(4) 确保用于包裹配送的车辆数量不超过承运商可用的车辆数量。(5) 和 (6) 确保只有一辆车辆从终端 $i$ 驶往终端 $j$。(7) 表示配送至终端 $i$ （即 $q_i$）的货物必须满足需求 [4], [5]。此外，配送量不得超过车辆 $v$的容量。终端 $i$ 的需求和车辆 $v$ 的容量分别用 $D^{\mathrm{dem}}_{i}$和 $C^{\mathrm{cap}}_{v}$表示。 $q_i$ 表示在包含终端 $i$ 的路线上的待配送包裹总数。请注意，实际配送前，客户的需求会被装入包裹。此外，车辆司机可以检查车辆的容量。如果车辆容量不足以装载包裹，则由另一辆车辆负责配送包裹。(8) 用于表示终端 $i$ 是否为路线上的第一个配送终端。(9) 适用于终端 $i$ 不是路线上的第一个终端的情况，用以确保终端 $j$配送的包裹数量（即 $q_j$）必须大于或等于从配送中心到终端$i$ 的路线上的已配送包裹数量与终端 $j$ 的包裹数量（即 $D^{\mathrm{dem}}_{j}$）之和。(10)、(12) 和 (13) 表示相应变量的二元整数约束。(11) 表示相应变量的非负整数约束。

式（1）—（13）中所 प्रस्तुत的整数规划模型的复杂度为$\mathcal{O}(|\mathcal{L}|^2)$ [6] 其中 $\mathcal{O}(\cdot)$和 $|\mathcal{L}|$ 分别表示大 $\mathcal{O}$ 表示法以及车辆需要访问的终端最大数量。该复杂度意味着，随着终端数量的增加，求解整数规划模型以获得解的计算时间呈指数增长。

式（1）—（13）的最优解为 $x^{*}_{v}$、$y^{*}_{i}$、$_{j}$、$_{v}$和$z^{*}_{i}$、$_{v}$，这些解使承运商的配送成本最低。随后，行程延误计算如下：

$$\Phi(\mathcal{L}) = \sum_{i,j\in\mathcal{L}} \frac{D^{\mathrm{dst}}_{i,j}}{V^{\mathrm{spd}}_{i,j,v}} y^{*}_{i,j,v}, \tag{14}$$

其中，$V^{\mathrm{spd}}_{i}$ $_{v}$ , $_{j,}$ 表示车辆 $v$ 从终端 $i$ 驶往终端 $j$的平均速度，$D^{\mathrm{dst}}_{i}$, $_{j}$ 表示终端 $i$ 与终端 $j$之间的距离。该承运商车辆的行程延误被定义为终端集合 $\mathcal{L}$的函数。行程延误是客户所关注的因素之一

，在选择承运商时，本文将通过随机演化博弈对该决策进行分析。

## V. 随机演化博弈建模

本节构建随机演化博弈，以对客户的承运商选择进行建模。该博弈包含以下四个组成部分：参与者为客户。群体为客户集合。客户的策略是选择一家零担承运商。承运商集合，即策略空间，表示为 $\mathcal{C}$。负收益定义为效用损失，它是服务费和平均包裹配送延误的函数。策略 $c \in \mathcal{C}$的效用损失，即客户选择承运商 $c$时的效用损失，定义如下：

$$U_c(n_c) = F_c + \pi(n_c), \tag{15}$$

其中， $n_c$ 是选择承运商 $c$的客户数量， $F_c$是服务费，而 $\pi$（$n_c$）是承运商 $c$的平均配送延误。从经济学角度来看，这种效用损失意味着客户通过选择合适的承运商，可以获得相应的益处（例如，因信任和对终端的偏好而获得较高的可靠性）。此外，承运商可通过平衡工作负荷，实现行驶成本最低。

给定 $n$ 位客户选择该承运商时，平均配送延误表示如下：

$$\pi(n) = nU + \overbrace{\sum_{i_1=1}^{T}\sum_{i_2=1}^{T}\cdots\sum_{i_n=1}^{T}}^{n}\left(\prod_{j=1}^{T}\left(\mathbb{P}_j\right)^{M_j}\Phi(\mathcal{L}_c(\{i_1,\ldots,i_n\})\right) \tag{16}$$

其中

$$M_j = \sum_{s=1,i_s=j}^{n} 1, \qquad j\in\mathcal{T}, \tag{17}$$

$$\mathcal{L}_c(\{i_1,\ldots,i_n\}) = \Big\{\{j\}\Big| j=1,\ldots,T; M_j>0\Big\}. \tag{18}$$

$U$ 是每位客户的包裹卸货时间，因此$nU$ 是 $n$ 位客户的总卸货时间。本文假设，可通过评估统计信息 [8]预先得知包裹卸货时间。 $i_s$ 是客户 $s$ 的包裹要配送到的终端。$M_j$ 是包裹要配送到终端 $j$的客户数量。根据式（1）—（13）中定义的车辆路径优化求解后，承运商 $c$ 在给定待访问终端集合 $\mathcal{L}_c$ 的情况下，其配送延迟 $\Phi$（$\mathcal{L}_c$）可由式（14）得到。 $\mathbb{P}_j$ 是客户希望将包裹配送到终端 $j$的概率。

在该博弈中，每位客户都会将自身的效用损失与所有承运商的平均效用损失进行比较。如果客户当前的效用损失高于新承运商的效用损失，就会转投该承运商。通过客户群体的这一策略行为，我们可以用马尔可夫链对客户的策略演化进行建模。马尔可夫链的状态空间定义如下：

$$\Omega = \Big\{(n_1,\ldots,n_N)\Big|\sum_{c=1}^{N} n_c = S\Big\}, \tag{19}$$

其中， $n_c$ 仍表示选择承运商$c$的客户数量。为应对马尔可夫链庞大的状态空间，可以采用最可能状态生成算法，以及分解、聚合和截断技术 [7]。从状态（$n_1, \ldots, n_N$）到状态（$n'_1, \ldots, n'_N$）的转移率表示如下：

$$Q_{(n_1,\ldots,n_N),(n'_1,\ldots,n'_N)} = \begin{cases} Kn_c(U_c - U_{c'}), & \text{if } U_c > U_{c'}, \\ \epsilon, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{20}$$

其中， $K$ 是一个与客户决策率有关的常数， $\epsilon$ 是一个与参与者非理性决策有关的小扰动率。具体而言，客户可能会犯一个小错误，选择效用损失更大的承运商。根据（20），转移率取决于两家承运商的效用损失之差，以及当前选择较差承运商（即效用损失较大的承运商）的客户数量。注意，每个状态 [4] 的自转移率表示如下：

$$Q_{(n_1,\ldots,n_N),(n_1,\ldots,n_N)} = - \sum_{(n'_1,\ldots,n'_N)\neq(n_1,\ldots,n_N)} Q_{(n_1,\ldots,n_N),(n'_1,\ldots,n'_N)}. \tag{21}$$

设 Q 表示马尔可夫链的转移矩阵，其元素为 $Q_{(n_1,\ldots,n_N),\ (n'_1,\ \ldots,\ n'_N)}$，通过求解 $\vec{\boldsymbol{\beta}}^\top \mathrm{Q} = \vec{\mathbf{0}}^\top$ 和 $\vec{\boldsymbol{\beta}}^\top \vec{\mathbf{1}} = 1$，可得马尔可夫链处于状态（$n_1, \ldots, n_N$）时的平稳概率，其中 $\vec{\boldsymbol{\beta}}$为平稳概率向量，0 是零向量，1 是全 1 向量。对于 $\epsilon \to 0$，如果状态（$n_1^\dagger, \ldots, n_N^\dagger$）的平稳概率不趋近于零，则该状态是随机稳定的。换言之，我们可以将状态（$n_1^\dagger, \ldots, n_N^\dagger$）视为博弈的稳定点，即均衡。

## VI. 性能评估

### A. 参数设置

为简化对所提出方法的性能评估，我们考虑 16 位客户的承运商选择问题。其中有两家零担承运商和三个终端（例如，机场、火车站和公交车站）。需要注意的是，所提出的方法能够处理大量客户（例如，100 位客户）和终端（例如，50 个终端）。两家承运商和三个终端的位置如图 1(b) 所示，距离单位为千米。我们采用新加坡 I.logistics Pte Ltd 公司提供的数据 [8]。承运商 1 和 2 各有一辆零担运输车辆。承运商 1 和 2 的车辆容量分别为 20 和 30 个包裹。每位客户的包裹卸货时间为 5 分钟。车辆的平均速度为 40 千米/小时 [8]。我们使用 GAMS/CPLEX 求解器 [9] 实现并求解每家零担承运商的车辆路径优化模型。零担运输车辆的行驶成本为每千米 0.982 美元 [10]。我们假设所有承运商因市场竞争而收取相同的费用。因此，客户只关注平均配送延误。对于马尔可夫链，我们设置 $K = 1$和 $\epsilon = 10^{-3}$。

表 I 显示了各承运商访问不同终端集合时的行程延误。显然，

表 I：承运商1和承运商2前往不同终端集合的行程延误。

| | 行程延误（分钟） | |
|---|---|---|
| 终端 | 运营商1 | 运营商2 |
| 1 | 2.400 | 18.228 |
| 2 | 8.625 | 17.376 |
| 3 | 9.450 | 17.340 |
| $1 \to 2$ | 13.425 | 29.253 |
| $1 \to 3$ | 14.250 | 30.078 |
| $2 \to 3$ | 26.700 | 35.415 |
| $1 \to 2 \to 3$ | 31.500 | 47.328 |

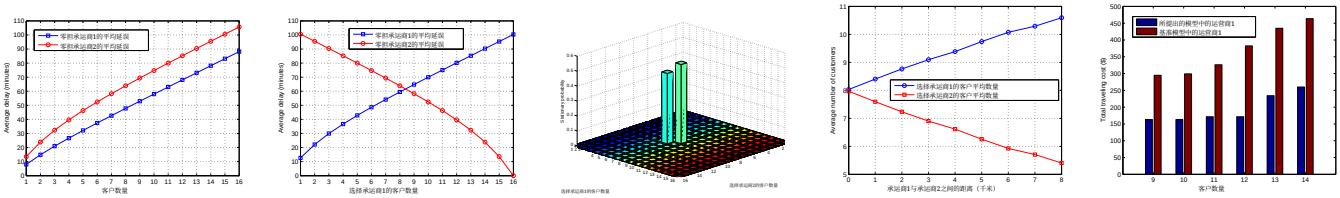
由于运营商1的位置离终端更近，其行程延误小于运营商2。

图2(a)显示了当所有客户不理性地选择承运商1或承运商2将包裹配送至终端时，在不同承运商位置下承运商的平均延误。换言之，所有客户只选择承运商1或承运商2，因为他们不考虑承运商的性能。在图2(a)中，随着客户数量增加，承运商包裹配送的平均延误显著增加。这是因为所有客户都做出了只选择承运商1或承运商2的非理性决策，从而导致承运商将客户的包裹配送至终端的平均延误增加。此外，承运商的包裹卸货总时间也会增加。

从图 2(a) 所示的结果可以看出，这也说明了我们提出的基于演化博弈的方法有助于分析承运商选择问题，从而使包裹配送中承运商的平均延误最小化。

接下来，我们考虑客户群体。图 2(b) 展示了选择各承运商的客户数量发生变化时，两家承运商的平均配送延误。例如，如果选择运营商1的客户数量为 2，那么选择运营商2的客户数量就是 14。从图 2(b) 可以看出，选择每家承运商的客户数量增加时，平均配送延误也会增加。这是因为客户越多，承运商需要访问更多终端的可能性就越大。此外，包裹卸货总时间也会增加。因此，客户为尽量减少自身效用损失而选择某家承运商的决策，也取决于其他客户的决策。分析客户的决策过程并获得承运商选择的稳定状态至关重要。

根据客户选择承运商的演化博弈，随机稳定状态，即选择各承运商的客户数量，如图2(c)所示。我们得到以下观察结果。首先，随机稳定状态具有非零的平稳概率 $\epsilon \to 0$。其次，随机稳定状态对应的客户选择承运商的数量会产生相近的平均配送延误。第三，存在多个随机稳定状态。这是因为这些状态会导致客户产生略高或略低的效用损失。因此，客户可以在这些状态之间切换，以实现相同的平均负效用。在所示的随机稳定状态中



(a) 无理性决策。 (b) 不同客户下的平均延误。 (c) 随机稳定状态演化博弈的。 (d) 客户平均数量选择不同承运商的客户。 (e) 总出行成本运营商1的比较

图2：(a) 客户未进行理性决策时承运商1和承运商2的平均延误；(b) 选择运营商1的客户数量不同时，承运商1和承运商2的平均延误；(c) 演化博弈的随机稳定状态；(d) 承运商2到承运商1的距离变化时，选择不同承运商的客户平均数量；(e) 所提出的模型与基准模型的总出行成本比较。

图2(c)中，第一个稳定状态表示八位客户选择运营商1，八位客户选择运营商2。第二个稳定状态表示七位客户选择运营商1，九位客户选择运营商2。

接下来，我们评估承运商位置对客户决策的影响。假设初始时运营商2与运营商1位于同一位置（见图1(b)）。随后，将运营商2的位置水平向东（右侧）移动，使其距离终端更远。图2(d)展示了承运商1到承运商2的距离变化时，选择各承运商的客户平均数量。显然，随着距离增大，运营商2到达全部三个终端所需的时间更长，因此配送延迟也会增加。由于服务表现较差，客户因此转而选择运营商1。这一结果清楚地表明，所提出的随机演化博弈模型能够捕捉车辆路径问题的物理参数，因而具有实用价值。

最后，我们比较所提出的模型与基准模型中运营商1的行驶成本。图2(e)展示了随着客户数量变化，所提出的模型与基准模型的性能对比。对于基准模型，我们假设所有客户都做出非理性决策，仅选择运营商1。显然，与基准模型相比，所提出的模型能够显著降低运营商1的行驶成本。

## VII. 结论

由于资源有限（即承运商拥有的车辆有限），包裹配送绩效可能取决于承运商服务的客户数量。本文研究了零担运输服务，使客户能够选择绩效最佳的承运商。由于客户可以动态调整决策，我们提出了随机演化博弈模型，以分析客户群体的决策行为。我们首先建立车辆路径优化模型，以求得使承运商成本最小化的最优配送路线。随后，我们建立演化博弈模型，以确定不同承运商所选择的客户数量对应的随机稳定状态。演化博弈中客户的效用损失是车辆路径优化问题所得配送延迟的函数。数值结果验证了随机稳定状态的存在；在这些状态下，所有客户的平均效用损失相同。有趣的是，在其中一个随机稳定状态下，七名客户选择运营商1，九名客户选择运营商2，这是因为两者的平均效用损失相同。

未来的工作中，我们将考虑多个客户群体，并为其分别定义不同的（负）效用。我们还可以优化服务费，以最大化承运商的利润。此外，我们将研究车辆平均速度对均衡解的影响。

## 致谢

本研究由新加坡国家研究基金会和国防科技研究院通过新加坡人工智能计划（AISG Award No: AISG2-RP-2020- 019）资助；并由新加坡国家研究基金会（NRF）和资讯通信媒体发展局通过未来通信研究发展计划（FCP）资助；同时获得能源研究测试平台与产业合作资助计划的支持，该计划是能源电网（EG）2.0 计划的一部分；此外还获得了 DesCartes 和卓越研究与技术企业园区（CREATE）计划的支持；阿里巴巴集团通过阿里巴巴创新研究（AIR）计划和阿里巴巴—南洋理工大学新加坡联合研究院（JRI）提供资助；以及南洋理工大学南洋助理教授计划的支持。

## 参考文献

[1] F. Farokhi、W. Krichene、A. M. Bayen 和 K. H. Johansson，“异质路由博弈”，《Allerton年度通信、控制与计算会议》，美国伊利诺伊州蒙蒂塞洛，第448–455页，2013年。[2] A. Aswani 和 C. Tomlin，“GPS辅助车辆的能源效率博弈论路由”，《2011年美国控制会议论文集》，美国加利福尼亚州旧金山，第3375–3380页，2011年。[3] C.-W. Chu，“整车运输和零担运输问题的启发式算法”，JOR，第165卷第3期，第657–667页，2005年。

[4] R. Kaewpuang、D. Niyato、P. -S. Tan 和 P. Wang，“整车运输和零担运输车辆系统中的协同管理”，IEEE TVT，第66卷第7期，第5707–5722页，2017年。[5] X. Li，2015年，《带时间窗的容量车辆路径问题：膳食产品非营利组织取货案例研究》，亚利桑那州立大学，亚利桑那州，美国。[6] J. K. Lenstra 和 A. H. G. Rinnooy Kan，“车辆路径规划和调度问题的复杂性”，Networks，第11卷第2期，第221–227页，1981年。[7] E. de Souza e Silva 和 P. M. Ochoa，“马尔可夫模型中的状态空间探索”，ACM SIGMETRICS计算机系统测量与建模联合国际会议，第152–166页，1992年。[8] I.Logistics，http://www.ilogpteltd.com.sg，2022年。[9] GAMS 求解器，https://www.gams.com，2022年。[10]货运运营成本分析：2015年更新版，
h
t
t
p://atri-online.org/
wp-content/uploads/2015/09/ATRI-Operational-Costs-of-Trucking-2015-FINAL-09-2015.pdf，2015年。